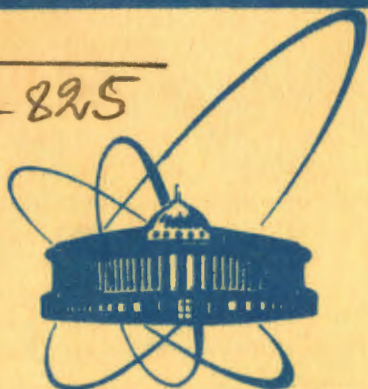


83-753

~~ЛЯП~~

Б-825



ЗИЛ
СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

943/84

P9-83-753

З.В.Борисовская, С.Б.Ворожцов, Т.Н.Дударева

РАСЧЕТ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ
МАГНИТНЫХ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЕЙ
МЕТОДОМ ОБЪЕМНЫХ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

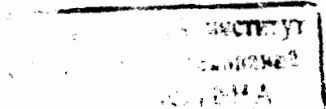
1983

В данной работе рассматриваются возможности численного моделирования циклотронных и синхротронных магнитных систем со сверхпроводящей обмоткой. Расчеты выполнялись на основе метода объемных интегральных уравнений с использованием разработанной специализированной системы программ MAGSYS^{/1/}. При помощи этих программ численно решается нелинейное векторное интегральное уравнение относительно индукции магнитного поля

$$\vec{B} = \frac{1}{4\pi} \int \frac{\mu-1}{\mu} \left[\frac{3\vec{R}(\vec{B}\vec{R})}{R^5} - \frac{\vec{B}}{R^3} \right] dV = \vec{B}_c, \quad /1/$$

где \vec{R} - радиус-вектор между точкой источника и точкой наблюдения; $\mu = (|\vec{B}|)$ - магнитная проницаемость; \vec{B}_c - магнитная индукция токовой обмотки. Интеграл в /1/ представляет вклад в индукцию поля от намагниченной среды. Решение /1/ определяется лишь в пределах области магнитопровода, которая представляется как совокупность подобластей - конечных элементов. В пределах каждого элемента магнитная индукция, следовательно, магнитная проницаемость, предполагаются постоянными. Уравнение в форме /1/ оказалось при решении численно более устойчивым, чем уравнение относительно вектора намагничивания, рассматриваемое в работе^{/2/}. Решение нелинейной алгебраической системы, к которой сводится /1/ при численном решении, осуществлялось методом "погружения". При помощи разработанной системы программ были проведены расчеты ряда магнитных систем ускорителей заряженных частиц. Для секторного циклотронного магнита /МГТН/^{/1/} при индукции 1,8 Т в рабочем диапазоне радиусов точность расчета по среднему полю при 192 элементах в сравнении с данными измерений составила $5 \cdot 10^{-3}$ /1/.

С целью дополнительной оценки точности был проведен расчет магнитного поля модели Миланского циклотрона^{/3/} со сверхпроводящей обмоткой /рис.1а/. Это магнит броневого типа со спиральными полюсными шиммами. Полюс имеет вертикальные отверстия для инъекции частиц и установки элементов высокочастотной системы. Численная модель магнита приведена на рис.1б. В расчете цилиндрические отверстия в полюсе были заменены эквивалентными по объему концентрическими проточками. На рис.2 показано распределение магнитной проницаемости магнитопровода. Точность расчета по азимутальному среднему полю составила $6 \cdot 10^{-3}$ в рабочем диапазоне радиусов /рис.3а/. Расчетная кривая поля из работы^{/3/} /двумерная сеточная методика в сочетании с методом равномерного намагничивания/ имеет отличие от экспериментальной



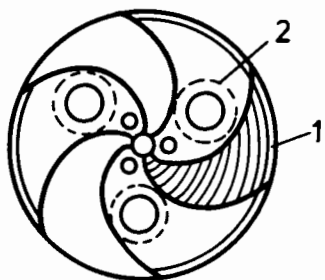


Рис.1а. Полусный наконечник Миланского циклотрона /вид сверху/. 1 - спиральные шиммы, 2 - полюсная накладка.

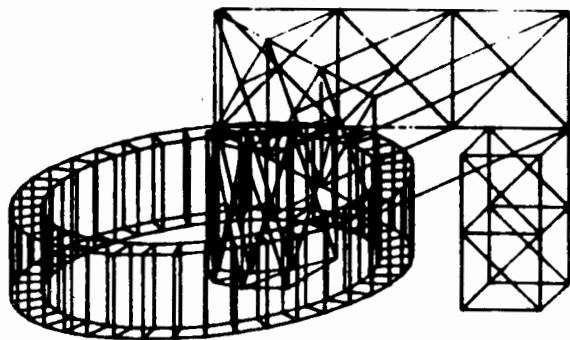


Рис.1б. Численная модель магнита Миланского циклотрона.

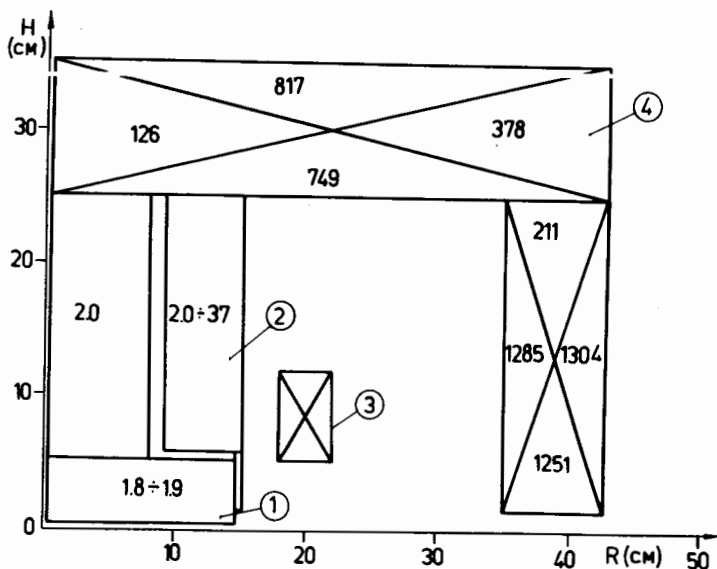


Рис.2. Распределение относительной магнитной проницаемости в пределах магнитопровода Миланского циклотрона. 1 - спиральные шиммы, 2 - полюсная накладка, 3 - токовая обмотка, 4 - ярмо.

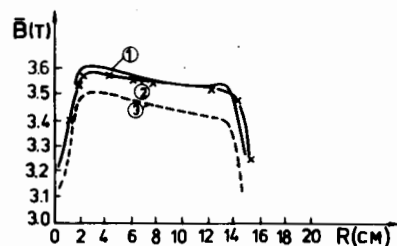


Рис.3а. Среднее магнитное поле Миланского циклотрона. 1 - расчет по MAGSYS, 2 - измеренная кривая, 3 - расчет двумерной методикой + метод равномерного намагничивания.

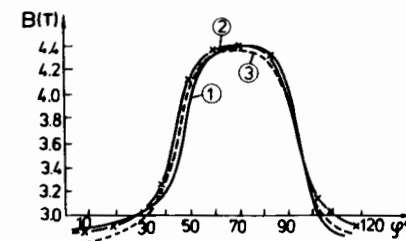


Рис.3б. Распределение поля вдоль азимута для $R = 8,5$ см. /Миланский циклотрон/. Обозначения те же, что и для рис.3а.

кривой $\sim 3 \cdot 10^{-2}$. На рис.3б приведено аналогично рис.3а сравнение азимутальных кривых поля.

На стадии уточнения параметров для эскизного проектирования сверхпроводящих магнитных систем дейтронного циклотронного комплекса на энергию 2 ГэВ^{4/} выполнялись расчеты радиально-секторной и спирально-секторной структур двух ускорителей комплекса /ДЦ-I и ДЦ-II/.

Численная модель ДЦ-I представлена на рис.4, конфигурация радиально-секторного магнита - на рис.5. где нанесена также проекция вектора намагничивания в плоскости YOZ для отдельных

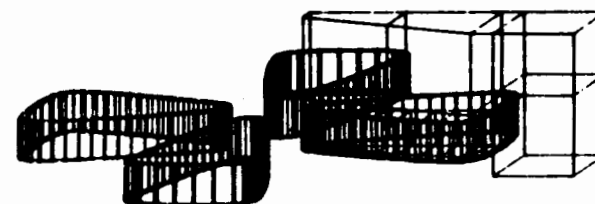


Рис.4. Численная модель ДЦ-I.

областей магнитопровода. Цифрами отмечены значения относительной магнитной проницаемости в отдельных областях магнитопровода. Азимутальные распределения для начального, среднего и конечного радиусов магнитного поля системы представлены на рис.6.

Точность расчетов ДЦ-I, оцениваемая на основании сравнения двух расчетов с различным числом и формой элементов /108 и 30/ в соответствии с рис.7, составила $4 \cdot 10^{-3}$.

При расчете сверхпроводящего магнита определение пондеромоторных усилий на отдельные части системы играет важную роль.

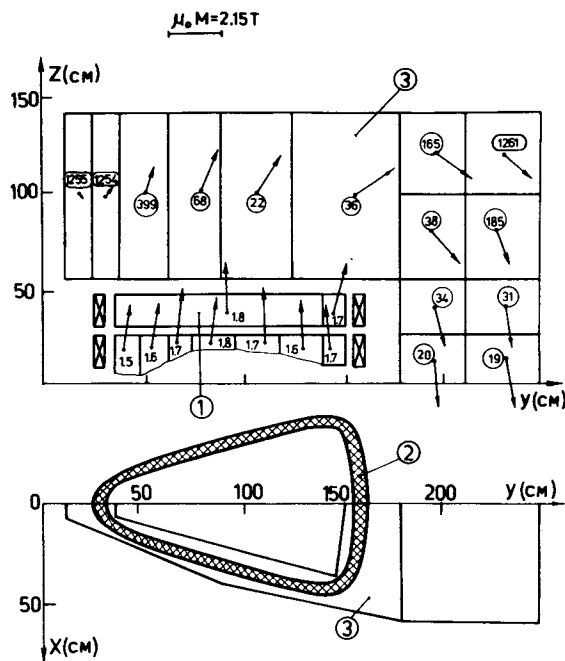


Рис.5. Распределение относительной магнитной проницаемости и поле вектора намагничивания для ДЦ-1. 1 - полюс, 2 - токовая обмотка, 3 - ярмо.

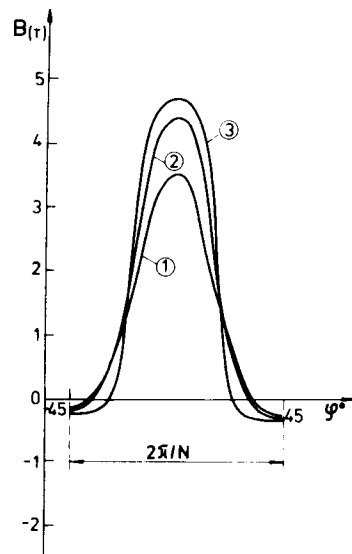


Рис.6. Распределение поля вдоль азимута для ДЦ-1. I - R = 30 см. II - R = 47,5 см. III - R = 130 см.

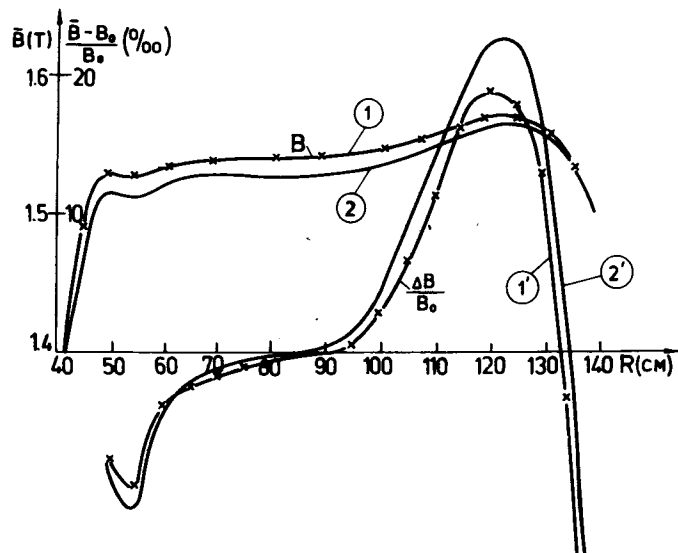


Рис.7. Оценка точности расчета ДЦ-1. 1, 1' - 30 элементов, 2, 2' - 108 элементов.

Поэтому для ДЦ-I вычислялись усилия на обмотку, полюс и ярмо. Так, например, линейная плотность растягивающих обмотку сил составляет ~3 МН/м.

Магнитная система II каскада дейтронного комплекса /ДЦ-II/ состоит из 9 спирально-секторных магнитов со сверхпроводящими обмотками /рис.8/. Геометрия магнита с распределениями вектора

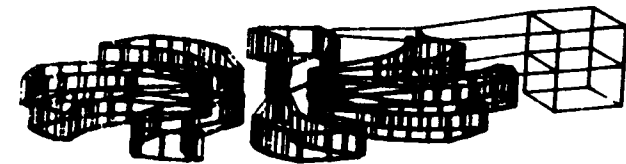


Рис.8. Численная модель ДЦ-II.

намагниченности показана на рис.9. Азимутальные распределения поля для четырех характерных радиусов представлены на рис.10. Как видно из рисунка, поле обратного знака между секторами достигает 30% поля в холме.

Магнитная система сверхпроводящего синхротрона-инжектора на энергию протонов 1,5 ГэВ состоит из импульсных сверхпроводящих /СП/ магнитов и линз^{5,6/}.

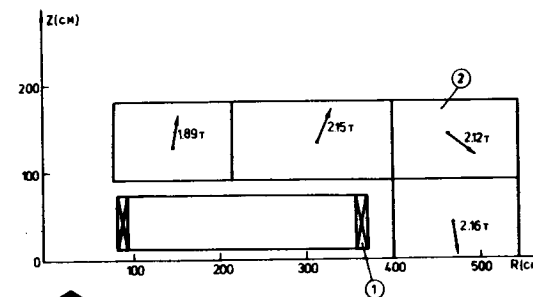
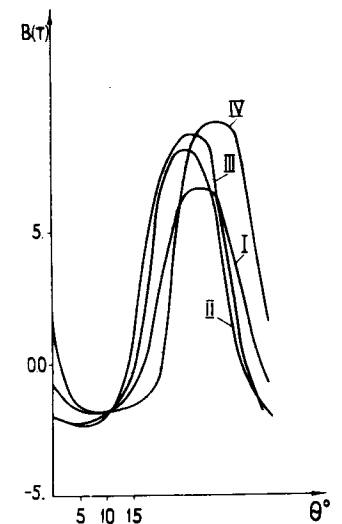


Рис.9. Поле вектора намагничивания ДЦ-II. 1 - токовая обмотка, 2 - ярмо.

Рис.10. Распределение поля вдоль азимута для ДЦ-II. I - R = 140 см, II - R = 200 см, III - R = 260 см, IV - R = 310 см.



Магнитное поле дипольного магнита формируется СП обмоткой и близко расположенным железным сердечником. На рис.11 показана расчетная модель обмотки СП диполя и 1/8 железного яра.

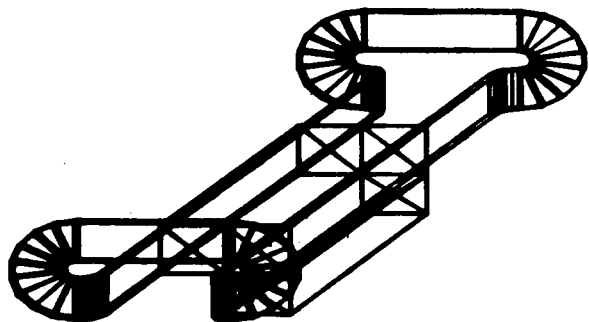


Рис.11. Численная модель дипольного магнита сверхпроводящего синхротрона-инжектора на энергию протонов 1,5 ГэВ.

Конструкция магнита /апертура $65 \times 55 \text{ мм}^2$, длина яра 42 см/ позволяет формировать поле в диполе высокооднородным практически по всей длине магнита. Однако вследствие искажений на торцах магнита формы поля величина его интегральных нелинейностей составляет $\sim 0,3\%$. Система программ MAGSYS позволяет проводить исследования неоднородностей полей СП диполей и квадруполей по величинам амплитуд высших пространственных гармоник поля, отнесенных к основной. Исследования зависимости точности расчетов гармоник поля от числа конечных элементов разбиения области железного экрана показали, что уже при 48 конечных элементах величины секstupольной и декапольной гармоник для центрального поля СП диполя, рассчитанные по MAGSYS и с помощью конечно-разностного метода /система программ POISSON^{7/} /, отличаются всего на $\sim 1 \cdot 10^{-3}$. Расчетное распределение интегральных нелинейностей /суммарная нелинейность по секstupольной и декапольной гармонике/ для СП диполя /рис.12, I/ с точностью $3,2 \cdot 10^{-3}$ совпало с предварительными результатами измерений индукционными катушками при 4,2 К /рис.12, II/.

СП квадруполь с прямоугольной апертурой $84 \times 42 \text{ мм}^2$, двухслойной обмоткой на торцах и длиной сердечника 11,6 см рассчитан на градиент 88 Т/м при токе 1,63 кА. На рис.13 представлена расчетная модель СП обмотки квадруполя. Распределение величины G /градиента поля/ вдоль оси квадруполя представлено на рис.14. Видно, что величину градиента можно считать постоянной лишь на 1/3 длины железного сердечника, считая от центра квадруполя. Это

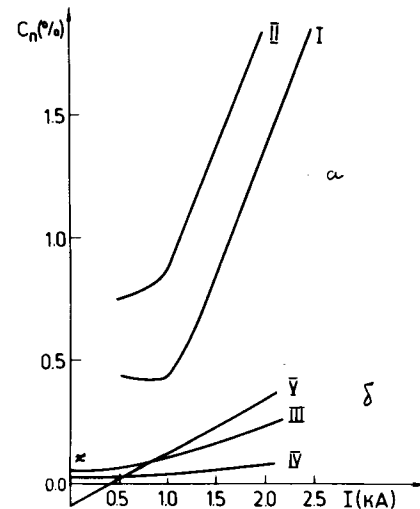


Рис.12. Распределение интегральных нелинейностей поля в зависимости от числа ампервитков. а/ для дипольного магнита: I - расчет, II - измерения; б/ для квадрупольного магнита: III - расчет четвертой гармоники, IV - расчет шестой гармоники, V - расчет восьмой гармоники, X - измерения.

Рис.13. Численная модель квадрупольного магнита.

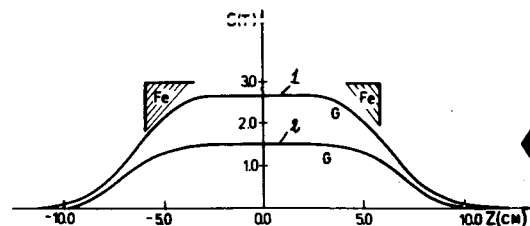
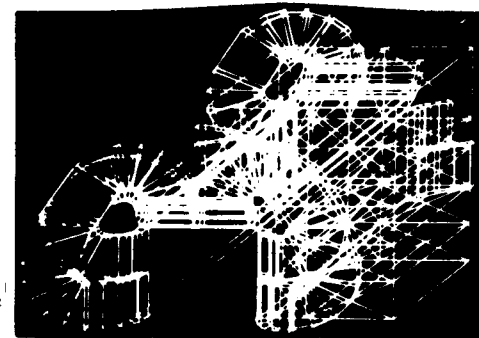


Рис.14. Распределение величины G /градиента/ поля. 1 - СП-квадруполь, 2 - без железного СП-квадруполь.

обстоятельство учитывалось при измерении поля индукционными катушками в центральной области квадруполя. Расчетные распределения интегральных нелинейностей поля СП квадруполя в зависимости от числа ампервитков /рис.12, III, IV, V/ хорошо согласуются с результатами предварительных измерений индукционными катушками в "теплом" варианте для значения тока $I = 50 \text{ А}$. Это позволяет надеяться, что величина интегральных нелинейностей для разных уровней индукции будет не более $2 \cdot 10^{-3}$.

Система программ MAGSYS предназначена для ЭВМ типа CDC-6500 и ЕС-1060. Число элементов разбиения области магнитопровода для рассмотренных выше примеров изменялось от 4 до 192, затрачиваемое время центрального процессора CDC-6500 для проведения одного расчета варьировалось, соответственно, от нескольких минут до 20 час.

В таблице представлена краткая сводка данных по всем магнитным системам, рассматриваемым в настоящей работе.

Таблица

| Магниты | Число конечных элементов | Время центрального процессора CDC-6500 /в ч./ | Максимальное поле в рабочей обл. /Т / | Относительная точность расчета |
|---------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| МГТН ^{1/} | 192 | 20 | 1,8 | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| Миланский циклотрон | 32 | 0,7 | 4,3 | $6 \cdot 10^{-3}$ |
| ДЦ-I | 30 | 1,2 | 4,6 | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| ДЦ-II | 4 | 0,4 | 9,4 | - |
| Диполь | 48 | 1,4 | 2,5 | $3 \cdot 10^{-3}$ |
| Квадруполь | 56 | 1,7 | 2,8 | $1 \cdot 10^{-3}$ |

На основании полученных результатов можно сделать заключение о том, что для данного класса сверхпроводящих магнитов ввиду почти полного насыщения магнитопровода или благодаря удаленности рабочей зоны от области ферромагнетика, точность расчетных распределений поля достаточна как для выбора параметров систем без построения промежуточных моделей, так и для интерпретации и дополнения магнитных измерений для испытываемых магнитов.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность Н.Л.Заплатину и И.А.Шелаеву за постановку задачи и поддержку в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акишин П.Г., Ворожцов С.Б., Жидков Е.П. ОИЯИ, Е9-11859, Дубна, 1978.
2. Armstrong A.G. et al. RL-76-029/A.
3. Acerbi E. et al. INFN/TC-79/10, 1979.
4. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, Р9-81-734, Дубна, 1981.
5. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, Р9-82-383, Дубна, 1982.
6. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, 9-12346, Дубна, 1979.
7. Жидков Е.П. и др. ОИЯИ, Р9-81-12, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 ноября 1983 года.

Борисовская З.В., Ворожцов С.Б., Дударева Т.Н.
Расчет сверхпроводящих магнитных систем ускорителей
методом объемных интегральных уравнений

Р9-83-753

Рассматриваются возможности численного моделирования циклотронных и синхротронных магнитных систем со сверхпроводящей обмоткой. Расчеты выполнялись на основе метода объемных интегральных уравнений с помощью разработанной специализированной системы программ MAGSYS. Оценка точности получаемых результатов проводилась путем сравнения расчетных распределений с измеренными и составила $(2+6) \cdot 10^{-3}$, что достаточно как для выбора параметров систем без построения промежуточных моделей, так и для интерпретации и дополнения магнитных измерений для испытываемых магнитов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований, Дубна 1983

Borisovskaya Z.V., Vorozhtsov S.B., Dudareva T.N.
The Calculation of Accelerator Superconducting Magnetic Systems
Using the Method of Volume Integral Equations

Р9-83-753

The possibilities of numerical modelling of cyclotron and synchrotron magnetic systems with superconducting coil are considered. The calculations have been made using the method of volume integral equations by means of the developed system of MAGSYS programs oriented exceptionally for these types of problems. The accuracy of the results obtained was estimated by comparing the calculated distributions with the measured ones and was equal to $(2+6) \cdot 10^{-3}$. This is sufficient to choose parameters of the systems without the construction of small size models and to interpret and supplement magnetic measurements for the magnets under test.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems and the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод Л.Н.Барабаш